

宽入射角衍射光学元件的优化设计及其在 目镜中的应用*

陈慧妍, 姜禹豪, 杨亮亮**, 刘成林, 赵勇兵

(盐城师范学院 物理与电子工程学院, 江苏盐城 224007)

摘 要: 对于宽入射角工作的衍射光学元件, 提出了高带宽积分平均衍射效率的优化设计方法。通过复合带宽积分平均衍射效率的最大化设计, 得到设计波长和设计入射角度, 进一步可以计算得到微结构高度。分析了衍射效率对折衍射混合光学系统调制传递函数的影响。优化设计了一套含有衍射光学元件的折衍射混合目镜系统。目镜由三片透镜组成。考虑衍射光学元件的衍射效率, 最大视场处目镜系统的调制传递函数高于0.42。该方法为混合光学系统的像质评价提供了依据。

关键词: 衍射光学; 广角; 衍射效率; 目镜

中图分类号: TN29; O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)04-0347-04

Optimal Design of Wide Angle Diffractive Optical Element and its Application in Eyepiece

CHEN Huiyan, JIANG Yuhao, YANG Liangliang, LIU Chenglin, ZHAO Yongbing
(School of Physics and Electronics Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng Jiangsu
224007, CHN)

Abstract: An optimal design method of high polychromatic integral diffraction efficiency (PIDE) was proposed for DOE working within wide incident angle. Through the maximization design of comprehensive PIDE (CPIDE), the design wavelength and the design incident angle were obtained, and the microstructure height could be calculated. The effect of diffraction efficiency on the modulation transfer function of hybrid optical systems was analyzed. A hybrid eyepiece system with DOE was optimized with three lenses. Considering the diffraction efficiency of the DOE, the MTF of the eyepiece system at the maximum field of view was higher than 0.42. This method could provide the basis for image quality evaluation of hybrid optical systems.

Key words: diffractive optics; wide angle; diffraction efficiency; eyepiece

收稿日期: 2023-03-09

* 基金项目: 国家自然科学基金(61904158); 江苏省智能光电器件与测控工程研究中心开放基金(306054014); 2023年大学生创新创业训练计划省级重点项目(202310324018Z)

作者简介: 陈慧妍(2003—), 女, 主要从事聚光光伏方面的研究;

姜禹豪(2003—), 男, 主要从事光伏发电方面的研究;

杨亮亮(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学设计、聚光光伏系统设计的研究。(E-mail: yang_liangliang@163.com)

** 通讯作者

引 言

衍射光学元件 (diffractive optical elements, DOE) 具有的负色散和消热差等特性,使其被广泛地应用于各种光学系统^[1-5]。衍射效率和带宽积分平均衍射效率 (polychromatic integral diffraction efficiency, PIDE) 是决定 DOE 工作波段和影响折衍射光学系统像质的重要参数。衍射效率对波长和入射角度的变化都比较敏感,通常只能在正入射时的设计波长处达到 100%。对于工作在一定入射角度范围内的 DOE,可以采用复合带宽积分平均衍射效率 (comprehensive PIDE, CPIDE) 全面系统地评价工作波段和入射角度范围对衍射效率的影响^[6-7]。

对于成像系统中的 DOE,通常基于标量衍射理论的 PIDE 最大化方法实现设计波长和微结构高度的优化设计,但是该方法没有考虑入射角度的影响^[8]。衍射微结构表面入射角度的增大会引起衍射效率下降。文献[9]设计了一个 7 mm 出瞳距、60° 视场角的显微目镜,目镜系统中使用的两个自由曲面增加了加工成本。文献[10]优化设计了含有衍射面的折衍射目镜,重量为 38 g,但是没有分析衍射效率对系统 MTF 的影响。文献[11]设计了一个 13 mm 出瞳距、重量 42 g 的折衍射 VR 显示系统。对于工作在宽入射角度范围内的 DOE,基于 CPIDE 最大化实现 DOE 结构参数的优化设计未见报道。

文中提出了宽入射角范围工作时,DOE 高衍射效率的优化设计方法。基于 CPIDE 的最大化得到设计波长和设计入射角度,进一步计算得到微结构高度。设计了含有 DOE 的折衍目镜系统,分析了 PIDE 对目镜 MTF 的影响。该方法可以分析含有 DOE 的混合光学系统的成像质量。

1 宽入射角 DOE 的优化设计

当光线以一定的入射角度 θ 入射到 DOE 上时, m 级的衍射效率可以表示为:

$$\eta_m(\lambda, \theta) = \sin^2 \left\{ m - \frac{d}{\lambda} \left[\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta} - n_1(\lambda) \cos \theta \right] \right\} \quad (1)$$

式中 d 表示衍射表面的微结构高度, n_1 与 n_2 分别表示入射与出射介质材料的折射率。为了实现 DOE 第 m 级的衍射效率最大,即为 100%,微结构高度为

$$d(\lambda, \theta) = \frac{m\lambda}{\sqrt{n_2^2(\lambda) - (n_1(\lambda) \sin \theta)^2} - n_1(\lambda) \cos \theta} \quad (2)$$

光线正入射时,微结构高度由设计波长 λ_0 决定,即:

$$d = \frac{m\lambda_0}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} \quad (3)$$

由公式(2)可知微结构高度的大小不仅与波长有关,还与入射角度相关。入射角度增大,微结构高度会随之改变,进一步影响公式(1)的衍射效率,导致折衍射混合光学系统的像质变差。所以,对于宽入射角折衍射混合光学系统中的 DOE,实现高衍射效率的优化设计很重要。

当入射角度确定时,工作在 $\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$ 波段范围内 DOE 的 PIDE 可以进一步表示为:

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda \quad (4)$$

DOE 的 PIDE 会影响折衍射光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)。为了准确评价折衍射光学系统的成像质量,系统的综合 MTF 用理论 MTF 与 PIDE 的乘积表示,即:

$$MTF(f_x, f_y) = \bar{\eta}_m \cdot MTF_0(f_x, f_y) \quad (5)$$

式中 f_x, f_y 表示光学系统的空间频率, $MTF_0(f_x, f_y)$ 表示光学系统的理论调制传递函数,可以利用光学设计软件得到。

当 DOE 工作在一定的宽入射角度范围时,只分析正入射或某一斜入射角度下的衍射效率像质的影响是不够准确的。广角光学系统的优化设计要保证在设计角度范围内都达到设计指标要求。用 CPIDE 来评价,即:

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_{cm}(\lambda, \theta) &= \frac{1}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \eta_m d\theta \\ &= \frac{1}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \cdot \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda d\theta \end{aligned} \quad (6)$$

式中 θ_{\min} 与 θ_{\max} 表示 DOE 的最小和最大入射角度。

利用公式(6),得到 CPIDE 的最大值,确定公式(2)中的设计波长 λ_0 和设计入射角度 θ_0 ,即可得到微结构高度 d_0 为:

$$d_0 = \frac{m\lambda_0}{\sqrt{n_2^2(\lambda_0) - (n_1(\lambda_0) \sin \theta_0)^2} - n_1(\lambda_0) \cos \theta_0} \quad (7)$$

2 仿真与分析

以工作在 0.45~0.65 μm 可见光波段的 DOE 为

例,进行衍射效率和结构参数的分析与讨论。基底材料采用光学塑料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),衍射级次 m 取1。正入射时 DOE 的 $PIDE$ 与波长的关系如图1所示。在整个波段范围内的 $PIDE$ 最高为 95.96%,此时对应的设计波长为 $0.537 \mu\text{m}$,利用公式(3)计算得到微结构高度为 $1.0864 \mu\text{m}$ 。

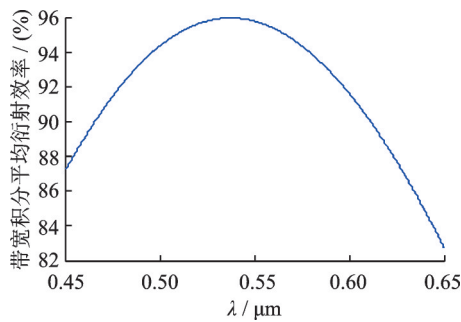


图1 正入射时的 $PIDE$ 与波长的关系

Fig.1 Relationship between $PIDE$ and wavelength at normal incidence

图2给出了 $PIDE$ 与入射角度的关系。当入射角度分别为 30° 和 35° 时,DOE 在整个波段的 $PIDE$ 分别为 93.32% 和 90.93%。可见,当 DOE 工作在非正入射的情况下,利用基于正入射时 $PIDE$ 的最大化得到的设计波长和微结构高度,计算得到的衍射效率并不高,不能得到最优的设计结果。

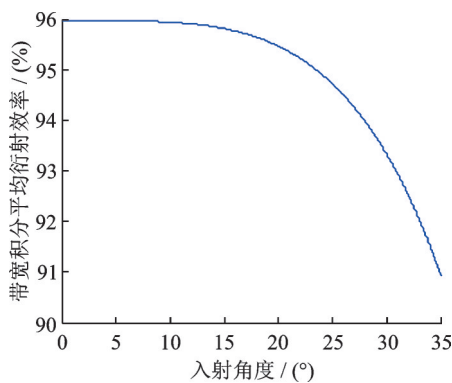


图2 $PIDE$ 与入射角度的关系

Fig.2 Relationship between $PIDE$ and incident angles

成像光学系统中的 DOE 一般工作在一定的入射角度范围内。若 DOE 工作在 $0^\circ \sim 35^\circ$ 的入射角度范围内,利用公式(4)计算得到 $PIDE$ 与入射角度和波长的关系分别如图3所示。 $CPIDE$ 最大值为 95.98%,对应的设计波长和设计入射角度分别为 $0.54 \mu\text{m}$ 和 18.37° ,进一步计算得到微结构高度为 $1.0557 \mu\text{m}$ 。

利用优化得到的微结构高度,当 DOE 工作在 0°

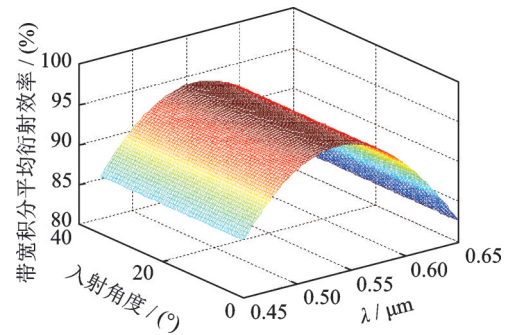


图3 $PIDE$ 与入射角度和波长的关系

Fig.3 $PIDE$ versus incident angle and wavelength

$\sim 35^\circ$ 时,在整个入射角度范围内 DOE 的 $PIDE$ 高于 93.02%,如图4所示。 35° 入射角度时的 $PIDE$ 提高了 2.09%。可见,当 DOE 工作在某一入射角范围时,由设计波长和设计入射角度共同决定微结构高度。对比传统方法,优化后的 $PIDE$ 得到改善。

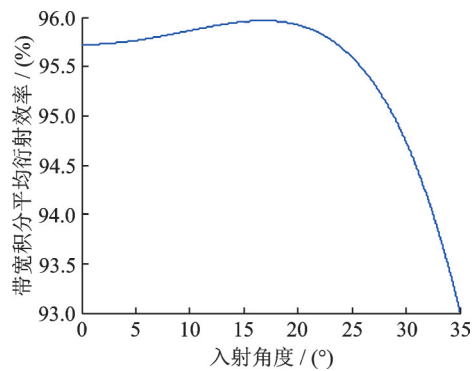


图4 优化后的 $PIDE$ 与入射角度的关系

Fig.4 Optimized $PIDE$ versus incident angle

3 含有 DOE 的目镜系统设计

目镜系统工作在 $0.45 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 波段,焦距为 26 mm,视场角度为 $\pm 15^\circ$ 。考虑到瞄准时的抖动影响,出瞳距取为 35 mm。根据上述设计指标,选取艾尔弗目镜作为初始结构,通过优化设计得到含有 DOE 的目镜结构如图5所示。系统共由三片透镜组成,总长为 33 mm,重量为 36 g。几个不同视场角度下系统的理论 MTF 如图6和表1所示,在 40 lps/mm 的空间频率处,最大视场处的 MTF 达到 0.45,满足

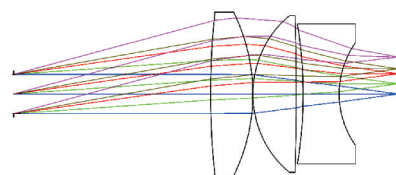
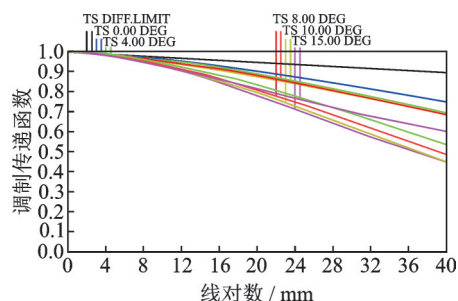


图5 目镜的结构

Fig.5 Structure of eyepiece

图 6 目镜的 MTF Fig.6 MTF of eyepiece表 1 入射角度与目镜系统的 MTF Tab. 1 Incident angle and MTF of eyepiece system

视场角度/(°)	0	4	8	10	15
入射角度/(°)	0	10	16.79	23.78	35
MTF_0	0.75	0.54	0.49	0.45	0.45
$PIDE$ /(%)	95.72	95.86	95.97	95.72	93.01
MTF	0.72	0.52	0.47	0.43	0.42

目镜系统的设计要求。

在目镜系统的结构中,第二片透镜的前表面为衍射面。从图 7 所示的位相可知,DOE 的最小环带周期宽度为 $31.931\ \mu\text{m}$,利用现有加工技术可以加工。

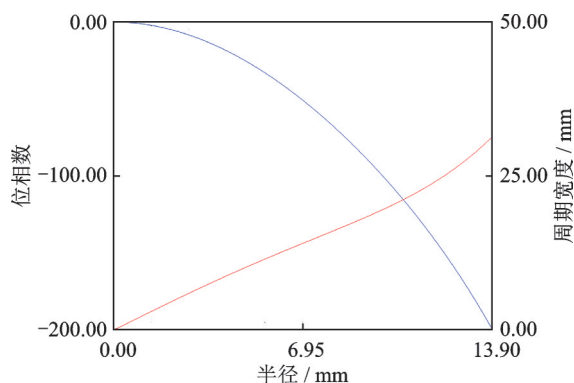


图 7 DOE 的位相

Fig.7 Phase of DOE

为了评价 DOE 对折衍射目镜像质的影响,需要考虑 DOE 的衍射效率对 MTF 的影响。不同视场度时对应的衍射面上的入射角度如表 1 所示,衍射面上的最大入射角度为 35° 。利用图 4 中得到不同入射角度下 DOE 的 $PIDE$,根据公式(5)计算得到综合 MTF 如表 1 所示。可见,考虑 DOE 衍射效率的影响时,目镜的 MTF 在最大视场处下降为 0.42,仍满足目镜的一般设计要求。

4 结 论

入射角度的改变会引起 DOE 的衍射效率发生变化。文中提出宽入射角范围工作的 DOE 高衍射效的设计方法。基于 $CPIDE$ 最大化得到设计波长和设计入射角度,进一步计算出微结构高度。该方法可以实现 DOE 在工作入射角度范围内都具有较高的 $PIDE$ 。设计了含有 DOE 的目镜系统,进行了 MTF 的分析。通过分析不同入射角度下的 $PIDE$ 对系统 MTF 的影响,可知最大视场处目镜的综合 MTF 从理论 MTF 的 0.45 下降到 0.42。该方法可以指导含有 DOE 的折衍射光学系统的像质评价。

参 考 文 献

- [1] Castignoles Fannie, Flury Manuel, and Lepine Thierry. Comparison of the efficiency, MTF and chromatic properties of four diffractive bifocal intraocular lens designs [J]. Opt. Express, 2010, 18(5): 5245-5256.
- [2] 杨美霞,孔哲,谭峭峰,等.基于环形光束整形的衍射光学元件的精确设计[J].光学学报,2019,39(3):0305002.
- [3] Shima Gharbi Ghebjagh, Fischer David, and Sinzinger Stefan. Multifocal multi-value phase zone plate for 3D focusing [J]. Appl. Opt., 2019, 58(32): 8943-8949.
- [4] Zhang Shuqing, Zhou Luyang, Xue Changxi, et al. Design and simulation of a superposition compound eye system based on hybrid diffractive-refractive lenses [J]. Appl. Opt., 2017, 56(26): 7442-7449.
- [5] 田晓航,薛常喜.小 F 数红外双波段无热化折衍射望远镜设计 [J]. 光学学报, 2022, 42(14): 181-187.
- [6] Yang Liangliang, Liu Chenglin, Li Shengqiang. Optimal design of depth-scaling error for multilayer diffractive optical elements with oblique incidence [J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4532-4536.
- [7] 杨亮亮,刘成林,陆法林,等.基于复合带宽积分平均衍射效率的倾斜误差研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0805001.
- [8] Xue C X, Cui Q F. Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency [J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 986-988.
- [9] 郭雨桐,常军,胡瑶瑶,等.基于自由曲面的高倍率广角显微目镜设计 [J]. 物理学报, 2020, 69(9): 148-155.
- [10] 夏寅聪,杨亮亮,李婧,等.轻小型长出瞳距目镜的设计 [J]. 光电子技术, 2020, 40(2): 129-133.
- [11] 江宝林,石利霞,郑茹,等.折/衍混合式 VR 显示光学系统设计 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 32-37.